

## 산업용 부하설비의 고조파 측정 및 분석 Harmonics Measurement and Analysis on Industrial load Facilities

한운동\*, 지평식\*\*  
Wun-Dong Han\*, Pyeong-Shik Ji\*\*

### <Abstract>

Harmonics happened due to nonlinear systems such as UPS, SCR controlled motors, and fluorescent lighting in distribute power system is very important subject to optimal operation and control of power system. Harmonics sometimes make incorrect operation of protective relaying system under normal condition on power system. In this study, total harmonics distortion(THD) of power were measured and analyzed by the field test on electrical facilities which were installed at the rural industrial complex in Chungbuk province. In addition, the deprivation of power factor by harmonics and the content of THD which is measured at neutral line was researched

**Key Words** : Harmonics, THD, PF, DPF

### 1. 서론

산업화 사회에서 정보화 사회로의 급속한 변화로 인하여 모든 분야에 걸쳐 신속성, 편리성 및 효율성의 극대화를 요구하고 있어 이를 충족하기 위한 제어기술의 발전과 더불어 각종 전력변환장치 등의 연구·개발이 가속화되고 있으며, 그 결과 비선형특성을 나타내는 부하설비 등이 급증하고 있고 이러한 부하설비는 기본파 이외에 고조파 발생의 원인이 되고 있다[1-3].

최근의 건축물들은 건물의 자동화, 사무자동화, 정보통신용 전원 등에 무정전전원장치가 필수적으로 시설되고 있고, 각종 산업 분야에서도 전동기 가변속구동용 인버터 및 사무자동화를 위한 컴퓨터 부하 등의 부하설비가 증

대되고 있는 실정이다.

이와 같은 무정전전원장치나 전동기 가변속 구동장치는 전력변환기인 인버터를 사용하게 되는데 이 경우 전원에는 상용 주파수 이외에 고조파 성분이 포함되어 다른 부하기에 영향을 주게 된다[4-6].

또한, 배전계통의 변압기나 대규모 배전선로 등은 유도성 부하설비가 용량성이 되는 경우 공진조건이 성립하면 이 고조파 전류는 더욱 증폭되어 각종 계전기의 오동작, 정밀전자기기의 오·부동작, 기기손상 및 과열의 원인이 될 수 있다. 또, 차단기 개방 또는 고장으로 정전 사고도 발생되고 있어 전원품질에 대한 관심은 더욱 증대될 것으로 예상된다[7].

또한, 각종 전력변환장치들은 전압 변동과 파형 왜곡, 주파수 변동, 지속적인 전기적 잡

\* 충주대학교 첨단과학기술대학 전기공학과, 교수, 工博  
E-mail : wdhan@chungju.ac.kr

\*\* 충주대학교 첨단과학기술대학 전기공학과, 조교수, 工博

\* Prof. Dept. of Electrical Engineering, College of Advanced Science and Technology, Chungju National University

음 및 과도전압 등의 영향을 쉽게 받기 때문에 이러한 점을 충분히 고려하여 신뢰성과 안정성을 확보할 필요가 있으며, 이러한 문제의 심각성에도 불구하고 현재 고조파로 인해 장해를 겪고 있는 국내 대부분의 수용가들은 외국에서 수입한 고가의 고조파 저감장치를 설치하여야 하는 실정이므로 경제적, 기술적 어려움을 겪고 있으며, 국내에서 고조파 저감을 위한 통합적 저감장치의 제작은 거의 진무하며, 기술적으로도 초보적인 수준에 있다[5-6].

따라서, 보다 합리적이고 경제적인 국산 고조파 억제장치의 보급이 절실히 필요한 실정이며, 이를 위해서는 산업용 부하설비에 따른 고조파 성분의 정량적인 분석이 선행되어야 할 것이다. 이러한 결과는 생산업체 전기설비의 설계 및 전기기기 선정시 기초자료 및 고조파 장해로 인한 각종 사고 예측 및 예방으로 산업 현장의 생산성 및 신뢰성을 향상시킬 것으로 기대된다.

본 연구는 전원의 품질 향상을 위한 대책 및 고조파 장해의 기초적 자료를 제공하기 위하여 공업단지 내의 제조업체를 대상으로 전원의 종합고조파 왜형률(THD ; total harmonics distortion)을 현장 실측을 통해 측정, 분석하여 그 결과를 제시하였다.

## 2. 고조파 측정 및 분석

본 연구에서는 전원의 품질 향상을 위한 대책 및 고조파 장해에 따른 기초적 자료를 제공하기 위하여 충청도내 ○○농공단지에 입주한 제조업체들의 자가용전기공작물을 대상으로 부하설비의 종합고조파왜형률을 측정, 분석하였다.

### 2.1 측정 대상 업체 선정

전원의 품질 즉, 고조파의 정도를 측정, 분석하기 위해 본 연구에서는 충청도내 ○○농공단지에 입주한 제조업체에 대하여 설비용량과 주요 부하 설비현황 등을 고려하여 Table 1과 같이 23개 업체를 선정하였다.

Table 1에서와 같이 선정된 업체의 주요 부하설비는 산업용부하를 대표할 수 있는 유도전동기와 사출기, 공기압축기, 전열부하 등으로 구성되어 있다.

Table 1. Selection of measurement target facilities

업종	주생산품	주요 부하설비	업체수	비고
제조	자동차부품	사출기, 공기압축기	3	
제조	산업용필터	유도전동기	2	
제조	합성수지	유도전동기, 전열부하	3	
제조	금속제관	유도전동기, 전열부하	4	
제조	포장자재	유도전동기, 전열부하	3	
제조	의약품	유도전동기, 공기압축기	3	
제조	서비스	유도전동기, 전열부하	5	

### 2.2 고조파 측정방법

자가용 전기설비 수용가에 대한 전원 공급의 안정성, 신뢰성 향상 및 전원품질의 평가를 위해 선정된 업체에 대하여 고조파 함유량 및 중성선 전류, 고조파에 의한 전원의 역률 저하 원인을 분석하기 위하여 본 연구에서는 현장 실측을 실시하였다.

대상업체 수전설비의 변압기 2차측에서 정밀전력분석계의 클램프를 이용하여 Fig. 1과 같이 3상3선식 또는 3상4선식으로 결선한 후 전원의 고조파를 측정하였다.

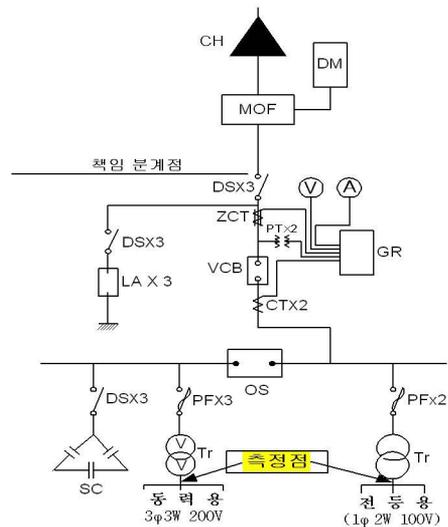


Fig. 1 Measurement setup

또, 측정 대상업체에 따라 변압기 BANK가 2~3개 일 경우에는 변압기 BANK별로 측정하였다.

측정시간은 순시치 측정의 경우 전국 산업

용 부하특성곡선을 참고하여 부하 가동율이 가장 많은 시간대인 오후 3시경으로 하였으며, 측정된 자료는 RS 232C 통신 케이블을 이용하여 개인 휴대용 컴퓨터에 저장하였다. 본 연구에 사용된 장비의 사양은 Table 2와 같다.

이와 같이 본 연구에 사용된 정밀전력분석계는 1사이클당 128개의 데이터 샘플링이 가능하며, RMS전압, RMS전류, 불평형율, 역율, 유효전력, 무효전력, 피상전력 및 50차까지의 고조파 등 전원의 스펙트럼분석을 통하여 전력사용 합리화 진단에 필요한 자료의 동시측정이 가능하며, 또한 고조파 함유량 증가에 따른 변압기용량 감소량 측정, 통신선로 장애율, 전력COST 등의 분석 및 평가 등이 가능하다.

Table 2. Specification of measuring equipment

장비명	항 목	측 정 범 위
정밀 전력 분석 계	입력 전압	80~270V, AC 45~450Hz, 100VA
	측정라인 방식	1 ϕ 2W, 1 ϕ 3W, 3 ϕ 3W, 3 ϕ 4W, N - G
	측정 전압	0~600V rms(직접연결시), 0.1 mV~600MV (PT이용시)
	측정 전류	0~3000A rms(Clamp사용시), 0.1 mV~3GA (CT이용시)
	소비 전력	100VA
	측정 전력	0~1800kW
	주 파 수	DC~3kHz
	온도 계수	±200 PPM/℃
	입력 저항	2MΩ
	온도/습도	0℃~50℃/RH 95%C
	표시 방식	LCD Display
	응답 속도	130μS
	외부 조작	RS 232C MODEM All computer control
오 차	V:±0.01% FS ±0.1% RDG, A:±0.01% FS ±0.1% ROG	
컴퓨터	Pentium 650MHz, HDD 4Gbyte, Notebook	

### 2.3 순시치 측정결과

측정 대상 23개 업체에 대한 변압기뱅크별 순시치를 측정, 분석하여 그 결과를 표 3에 나타내었다. 변압기뱅크 수에 따라 측정하였기 때문에 측정대상 수는 총 70개소로 나타났다. 종합 고조파함유율은 고조파 전압의 실효치와 기본 전압 실효치의 비로서 나타내며 고조파 정도를 나타내는데 사용된다. 따라서 전압 및 전류의 실효치는 1주기 128개의 데이터를 2주기로 샘플링하며, 전압과 전류의 순시치는 식

(1)과 같이 계산하였다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{256} V^2}{256}}, \quad I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{256} I^2}{256}} \quad (1)$$

여기서,  $V_{rms}$ 와  $I_{rms}$ 는 전압과 전류의 실효치를 나타낸다. 또, 종합 고조파왜형율은 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (2)$$

여기서,  $V_1$ 은 기본파 전압을 나타내며  $V_2, V_3, \dots, V_n$ 은 각 차수별 고조파 전압을 나타낸다. 전압 고조파 함유량에 대한 우리나라의 기준은 없으나 한국전력공사에서는 전압 고조파 왜형율을 3[%]이하로 할 것을 권고하고 있다.

전원의 전압 및 전류의 불평형율은 각 상의 전압 혹은 전류를 3상의 평균으로 나눈 값 사이의 최대 차로 IEEE에 정의된 것에 따라 계산된 값의 불평형을 백분율로 표현한 것으로 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$V_{Imbalance} = \frac{V_{max}}{V_{avg}} \times 100[\%] \quad (3)$$

Table 3은 이와 같은 방법에 의하여 전압 고조파함유율을 분석한 결과로 한국전력공사의 권장 기준치 3[%]이상의 수치를 나타내는 장소는 19개소로 전체 측정대상 수의 27[%]를 나타내고 있으며, 4.5~10[%]까지는 7개 업체가 나타나고 있다.

Table 3. THD distribution of voltage

전압THD 함유량[%]	1.0 이하	1.5 이하	2.0 이하	2.5 이하	3.0 이하
측정장소[호]	11	18	8	6	8
전압THD 함유량[%]	3.5 이하	4.0 이하	4.5 이하	10 이하	총계
측정장소[호]	4	4	4	7	70

이와 같이 전압 THD가 3[%]이상 나타나는 장소는 공장의 생산라인과 정밀 기기 제작업체로서 컴퓨터 부하에 따른 UPS 및 AVR의 사용이

많고, 또 유도전동기 부하의 속도제어를 위한 인버터 등의 사용이 대부분으로 나타났다.

Table 4. THD distribution of current

전압THD 함유량[%]		2.0 이하	3.0 이하	5.0 이하	10 이하	15 이하
측정장소[호]		5	7	14	17	9
20 이하	30 이하	50 이하	100 이하	100 이상	총계	
5	6	1	2	4	70	

또한, 전류 THD는 Table 4와 같이 측정업체 70개소 중에서 기준치 3[%]이상이 58개 업체로 전체 측정대상 업체의 82.9[%]를 차지하고 있으며, 4개의 업체는 100[%]이상을 나타내고 있어 전압에 비하여 전류의 파형은 상당히 찌그러져 전원의 품질 개선을 위한 대책이 필요할 것으로 사료된다.

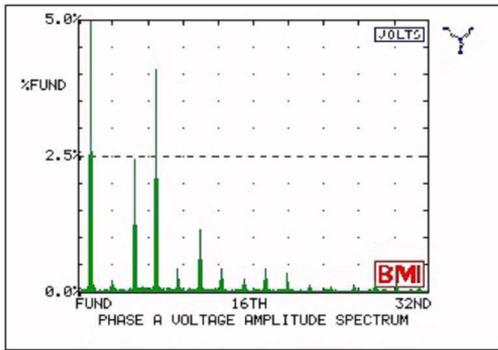


Fig. 2 An example of harmonics analysis

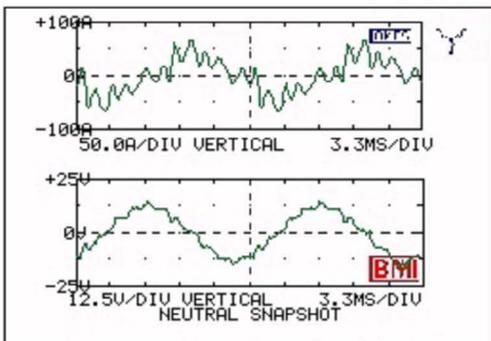


Fig. 3 Waveform of source voltage and current

Table 5 Average unbalance and THD of power source

측정 호수	전 불 평 형 율 [%]	압 불 평 형 율 [%]	전압 THD [%]	전류 THD [%]
70개소	4.99	17.46	4.53	47.24

Fig.2는 전압에 대한 각 조파별 기본파에 대한 고조파 함유율 분석 결과의 예를 나타내고 있다. 그림에서는 7차 및 9차의 고조파가 크게 나타나고 있다. 이와 같이 고조파에 의해 전원의 전압, 전류의 파형은 Fig.3과 같이 나타나고 있다. 그림에서 위 그림은 전류 파형을 나타내고 있으며, 아래 그림은 전압 파형을 나타내고 있다. Table 3과 Table 4에서 나타낸 바와 같이 전원 전압의 고조파 왜형에 의해 중첩되어 전류 파형은 더 많이 찌그러져 있음을 알 수 있다.

이와 같이 현장실측에 의한 대상 70개소에 대하여 분석한 결과 Table 5와 같이 측정대상 70개소 평균의 전압 불평형율은 4.99[%], 전류 불평형율은 17.46[%]로 나타나고 있으며, 전압 THD는 4.53[%], 전류 THD 47.24[%]로 전류에 대한 중합고조파 함유율은 상당히 높은 것으로 나타나 이에 대한 대책이 시급한 실정이다.

## 2.4 중성선 고조파 분석

전산설비, 복사기, 전자식 안정기 등의 단상정류기를 많이 사용함으로써 영상분 고조파 성분은 다른 차수의 고조파 성분보다 많은 양이 발생되며 이로 인하여 중성선에는 과전류가 흐르게 된다. 영상분 고조파 성분에 의하여 과전류가 흐르면 제3고조파는 기본파의 3배인 180[Hz]의 주파수 성분을 갖기 때문에 표피효과에 의한 케이블의 유효 단면적을 감소시켜 저항의 증가 현상으로 인한 차단기 및 케이블의 과열이 발생되며, 변압기의 열화를 촉진하게 된다. 또한, 보호계전기를 동작시켜 정전사고를 발생시키고 중성선의 대지 전위를 상승시켜 많은 사고를 유발한다. 본 절에서는 중성선의 THD를 측정 분석하고, 고조파로 인한 중성선 실효치 증가에 대해 정량적으로 분석하였다.

### 2.4.1 중성선 전류의 THD분석 결과

Table 6은 3상 4선식 수전설비에 있어서 순시측정 자료로서 중성선 전류의 THD분석 결

과를 나타내고 있다.

측정대상 개소는 전체 70개소중에서 3상4선 식으로 운용되는 44개소로 하였으며, 측정 결과 THD의 함유량이 500[%] 이상 나타난 곳은 4개소로 나타났으며, 또 100~500[%]도 12개소로 나타나고 있다.

Table 6. THD distribution of neutral line current [%]

THD 함유량[%]	20 이하	30 이하	50 이하	100 이하	500 이하	1000 이하	1000 이상	총계
측정장소 [호]	10	3	5	10	12	4	0	44

2.4.2 고조파에 의한 중성선 과전류 분석 결과

Table 7은 22,900[V], 3상4선식 450[kVA] 변압기가 시설된 ○○업체의 변압기의 2차측 (380/220[V])에서 측정한 각 차수별 고조파 함유량을 나타내었다.

Table 7. Harmonics ratio[%]

	FUND	3rd	5th	7th	9th	11th	13th	15th	17th	19th	THD
R상	100	2.6	26.4	0.4	2.6	10.8	4.1	0.6	1.8	0.9	29.1
S상	100	1.7	25.0	0.9	2.7	9.5	4.7	0.4	1.9	0.9	27.4
T상	100	1.3	26.2	1.2	0.2	8.6	2.9	0.5	1.5	0.6	27.9
N상	100	19.9	160.0	14.9	9.8	106.8	40.9	8.6	23.4	9.8	201.4

Table 7에 나타낸바와 같이 R, S, T상에 비하여 중성선에는 53.7[%]의 고조파가 함유되어 있는 것으로 나타났으며, 각 차수별 고조파의 크기를 Fig. 4에 나타내었다.

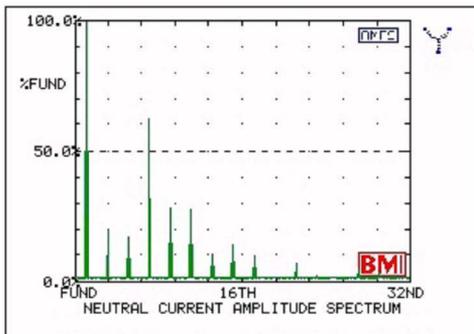
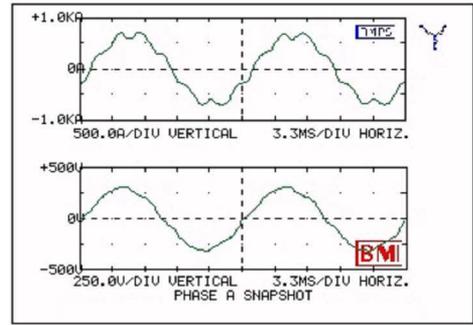
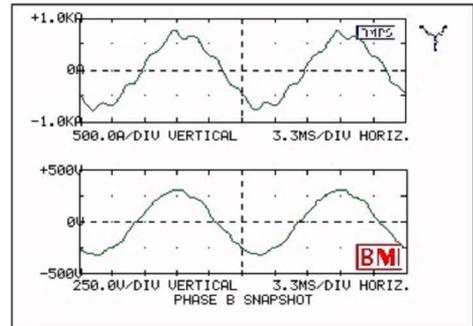


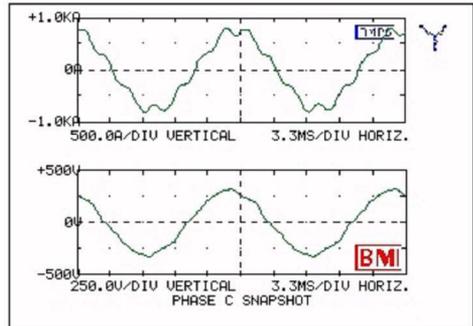
Fig. 4 Harmonics ration of neutral line



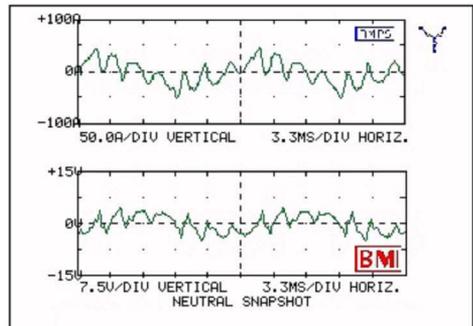
(a) Phase R



(b) Phase S



(c) Phase T



(d) Phase N

Fig. 5 Waveforms of each phase

또, Fig. 5에 각 상별 전압과 전류의 파형을 나타내었다. 일반적으로 3상4선식의 N상에는 각 상의 불평형 전류만이 흐르는 것이 정상이지만 (d)에서와 같이 N상에는 각 상의 영상분 고조파 전류의 합이 흐르고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 5의 전류 크기를 수치로 나타내면 Table 8과 같다. 표에서와 같이 N상에는 R, S, T 전류의 벡터합으로 0[A]가 흘러야 정상이지만 부하의 불평형에 의하여 4.5[A]가 흐르고 있다.

Table 8. Magnitude of harmonics[A]

상	FUND	3rd	5th	7th	9th	11th	13th	15th	17th	19th	실효치
R	279.3	7.26	73.73	1.12	7.26	30.16	11.45	1.68	5.02	2.51	290.8
S	277.9	4.72	69.48	2.50	7.50	26.40	13.06	1.11	5.28	2.50	288.2
T	279.2	3.63	73.15	3.35	0.56	24.01	8.10	1.40	4.19	1.68	289.8
N	4.5	0.9	7.20	0.67	0.44	4.81	1.84	0.39	1.05	0.44	10.1

R, S, T 상에는 기본파 전류가 가장 크게 흐르고 있으나 N상에는 5고조파 및 11고조파가 기본파 전류의 160[%], 106.8[%]가 흐르고 있다.

또한, N상의 제5차 및 제11차 고조파 성분은 R, S, T 상의 제5차 및 제11차 고조파 성분의 합에 해당하는 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 고조파 전류에 의한 중성선의 과전류는 비선형부하의 사용증가로 인하여 순시 측정한 결과 종합왜형을 500[%]를 상회하는 장소가 대상업체 총 44개중 4개소로 이는 차단기 및 케이블의 열화, 변압기의 열화, 보호계전기의 오·부동작 등을 발생할 수 있는 문제점을 안고 있다.

영상분 고조파 성분은 다른 차수의 고조파 성분보다 많은 양을 포함하고 있으며, 이는 컴퓨터, 복사기, 전자식 안정기, 인버터 등의 단상 설비를 많이 사용하고 있기 때문으로 해석된다.

이와 같이 고조파는 중성선의 전류 실효치 증대로 저항손실 및 유전손실 등을 증대시켜 전기기기에 대한 과열의 원인이 되고 있다.

### 2.5 고조파에 의한 역률 분석

고조파의 발생은 역률의 저하를 일으키게 되고 이로 인한 전력의 효율과 질을 감소시킨다. 고조파를 포함한 실제 역률의 계산식은 식

(4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\cos\theta$ 는 정사인파에서만 사용되는 것으로 이것은 고조파 등의 파형 왜곡이 전혀 없는 상태를 말한다. 따라서, 일반적으로 역율은 전압, 전류 파형의 장해(고조파 등)를 감안한 것이다. 그러나 식 (4)의  $I_{total(실효치)}$ 는  $I_{1(실효치)}$ 보다 고조파에 의해 그 값이 크기 때문에 고조파의 발생시에는 역율이 감소하게 됨을 알 수 있다.

$$PF = \frac{VA \cos \theta}{VA} = \frac{I_{1(실효치)} \cos \theta_1}{I_{total(실효치)}} \quad (4)$$

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100[\%] \quad (5)$$

고조파는 일반적으로 식 (5)와 같이 THD로 표현된다. 즉, 고조파 전류 실효치와 기본파 전류 실효치의 비로서 고조파 발생의 정도를 나타낸다. 한편, 역율과 THD의 관계는 식 (6)과 같다. 따라서 THD의 증가에 따라 역율은 감소하게 된다.

$$PF = \frac{\cos \theta_1}{\sqrt{(1 + THD)^2}} \quad (6)$$

따라서, 기본 전압, 전류에 파형의 위상차  $\cos\theta$ 만을 고려하면 식 (7)과 같이 실제의 역율(DPF ; displacement power factor)을 계산할 수 있다. 정사인파에서는 PF와 DPF의 값은 같다.

$$DPF = \cos(\theta \cdot V_{fund} - \theta \cdot I_{fund}) \quad (7)$$

Table 9. PF and DPF measurement result of sample facility

역율 종류	전류THD [%]	R상[%]	S상[%]	T상[%]	계[%]
PF	28.1[%]	0.83	0.83	0.83	<b>0.83</b>
DPF		0.87	0.86	0.87	<b>0.87</b>

즉, PF는 고조파를 포함한 역률로서 현재 사용중인 역률, 즉 역률계가 지시하는 일반적인 역률이며, DPF는 고조파 성분 등을 제외한 기본파에 대한 역률이다. 따라서 Table 7에 나타낸 ○○업체의 경우 PF와 DPF는 Table 9와

같다. 이와 같이 전류 THD가 28.1[%]인 경우 실제 역률 PF와 기본 역률 DPF는 약 4[%]정도의 차이가 발생함으로써 이러한 차이는 고조파 등 전력계통의 장애를 줄이면 역률이 개선될 것으로 사료된다.

Table 10. Average PF and DPF of measurements

측정호수	평균 PF[%]	평균 DPF[%]	비 고
70호	86.7	90.6	-3.9[%]

Table 10에 사례연구 대상 70개소에 대한 PF 및 DPF 계산결과에 따른 평균값을 나타내고 있다. 표에서 알 수 있는바와 같이 고조파 등의 영향에 따라 부하 역률은 약 3.9[%] 저하되어 있으며, 이는 공단지역의 고조파 등에 기인한 것으로 사료되며 부하설비에 대한 고조파 발생의 억제기술 등을 통해 개선되어야 할 것으로 사료된다.

### 3. 결 론

전원의 품질 향상을 위한 대책 및 고조파 장애에 따른 기초적 자료를 제공하기 위하여 충북도내 ○○농공단지에 입주한 자가용 전기 수용가를 대상으로 전원의 종합 고조파왜형율을 실측을 통해 측정, 분석하였다.

실측에 의한 전원의 종합고조파 왜형율은 한국전력공사 권장 기준치인 3[%]이상 나타나고 있어 이에 대한 대책이 필요한 것으로 사료되며, 고조파에 의한 전류의 실효치 증가로 인해 보호계전기의 오·부동작 등을 방지하기 위한 대책이 시급한 것으로 사료된다. 또한, 고조파 등의 영향에 따라 부하 역률이 저하정도를 분석을 통해 제시하였으며 이는 부하설비에 대한 고조파 발생의 억제기술 등을 통해 개선되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 생산업체 전기설비의 설계 및 전기기기 선정 시 기초자료 및 고조파 장애로 인한 각종 사고 예측 및 예방으로 산업 현장의 생산성 및 신뢰성을 향상시킬 것으로 기대되며 보다 정밀한 측정 및 분석을 위해 배전선로에서의 직접측정 방안이 필요할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2004학년도 충주대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- 1) J. Arrillaga, D. A. Bradley, *Power System Harmonics*, John Willy & Sons, 1985
- 2) W. S. Wood, F. P. Flynn and A. Poray, "Effects of Supply Voltage Waveform Distortion on Motor Performance", Int. Conf. on Source and Effect of Power System Disturbance, London, England, April, 1974, pp. 22-24.
- 3) R. Fisher, R. Hoft, "Three-Phase Line Conditioner for Harmonics Compensation and Power Factor Correction", IEEE IAS 87, 1987
- 4) G. T. Heydt, E. Gunther, "Post Measurement Processing of Electric Power Quality Data", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, pp. 1853~1859, Oct. 1996
- 5) 강창원, 이진석, "고조파에 의한 과전류 개선 사례", 한국전력기술인 협회지, 2000. 6.
- 6) 박한중, 강창섭, "고조파역제용 수동필터의 현장 적용화 연구", 한국전기안전공사 전기안전시험연구원, 연구보고서, 1999. 12
- 7) 高調波對策專門委員會, "電力系統における高調波とその對策", 電氣共同研究會, 第46卷 第2號, 1990. 6

(2005년 12월 20일 접수, 2006년 5월 20일 채택)